

## Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla

Radosław Tarkowski\*, Barbara Uliasz-Misiak\*\*

**Carbon dioxide sequestration by underground storage.** Prz. Geol., 51: 402–409.

*Summary.* The paper presents some major problems related to underground storage of carbon dioxide. The idea of underground storage is presented as one of methods of reducing the emissions of this greenhouse gas. A special attention is paid to the issues of capturing, transportation and costs of CO<sub>2</sub> storage. Problems with defining underground storage potential, physical and chemical effects of CO<sub>2</sub> injection into underground reservoirs and storage in underground aquifers, hydrocarbons deposits and coal seams are discussed. The attention is also paid to safety issues as well as gaining social acceptance for such operations. Some examples of CO<sub>2</sub> underground storage operations are described; selected European R&D programmes concerning these issues are presented. It is shown that sites for underground storage of this gas may be also found in Poland in proximity of major industrial sources of its emission; thus, research on this topic is highly advisable.

**Key words:** underground storage, carbon dioxide emission, aquifers, hydrocarbons deposits, storage safety, Poland

Problem dotyczący wyłapywania i unieszkodliwiania dwutlenku węgla stał się aktualny na początku lat dziewięćdziesiątych XX w. Było to związane z dyskusją dotyczącą efektu cieplarnianego oraz wpływu CO<sub>2</sub> na to zjawisko. Liczne europejskie programy naukowe dotyczące tej problematyki (JOULE II, SACS, SACS2, GESTCO, NASCENT, WEYBURN, CO2STORE, CO2NET, FSH, NGCAS, RECOPOL i in.) wskazują na wagę, jaką przywiązują kraje wysoko rozwinięte (UE, Japonia, Kanada, USA) do tego zagadnienia. Publikacje, które ukazały się w tym zakresie w ostatnim dziesięcioleciu, pokazują jak szybko koncepcja podziemnego składowania CO<sub>2</sub> przeszła ze stadium utopii do stadium pierwszych realizacji i spowodowała wzrost zainteresowania tym zagadnieniem wspólnoty międzynarodowej.

### Ograniczenie emisji dwutlenku węgla

W okresie ostatnich 150 lat, czyli od początku ery przemysłowej, stężenie dwutlenku węgla w atmosferze wzrosło prawie o 1/3, z 280 do 365 ppm, głównie w wyniku spalania paliw kopalnych (Marzec, 2001). Szacuje się, że po 1751 r., ok. 277 Gt węgla zostało wyemitowane do atmosfery. Połowa tej emisji pochodzi z lat 1970–1998 (ryc. 1). W 1998 r. światowa emisja dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych wyniosła 6,6 Gt węgla rocznie.

Podstawowym źródłem emisji dwutlenku węgla do atmosfery jest spalanie paliw kopalnych. Obecnie dostarczają ponad 85% produkowanej energii. Światowa Rada Energii przewiduje w 2060 r. konsumpcję paliw kopalnych 5 razy większą niż w 1985 r. O tyle więcej może być dwutlenku węgla w atmosferze. Skutki zwiększenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery mają negatywny wpływ na życie mieszkańców Ziemi. Raport opracowany przez grupę naukowców z IPCC (*Intergovernment Panel on Climate Change*) w 2000 r., przewiduje w XXI w. wzrost temperatury na Ziemi od 1,5 do 6°C. Może to doprowadzić do podniesienia się poziomu oceanów, znacznych regionalnych zmian klimatu i olbrzymich katastrof naturalnych (Garrigues, 2001).

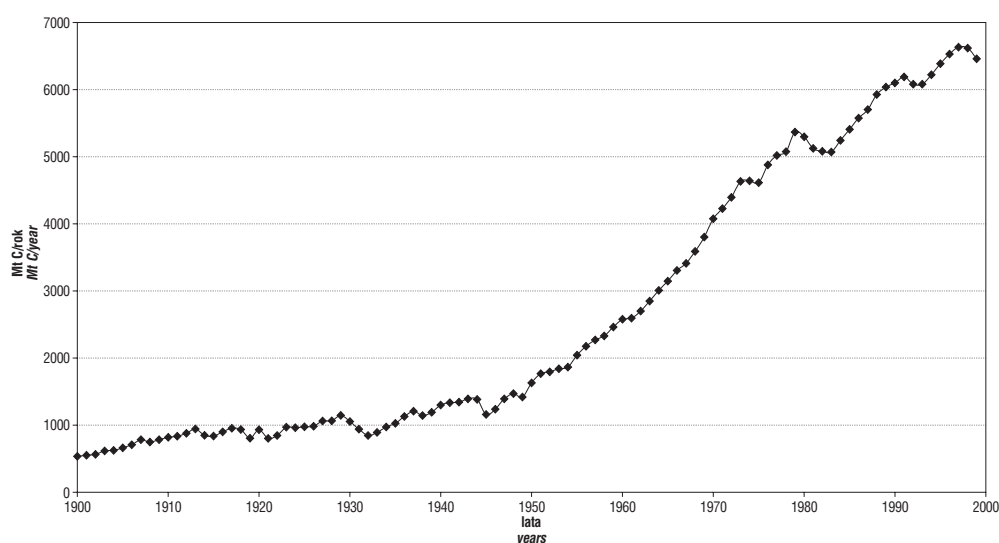
Problem ograniczenia emisji dwutlenku węgla dotyczy również Polski. Udział Polski w światowej emisji tego gazu wynosi ok. 2%. Największy udział w emisji gazów cieplarnianych w Polsce ma dwutlenek węgla, stanowiący średnio 82% emisji, przy rocznej emisji tego gazu w Polsce wynoszącej ok. 330 Mt (EMITOR, 2001), w przeliczeniu na węgiel ok. 90 Mt.

Biorąc pod uwagę kategorie źródeł emisji, według klasyfikacji IPCC, największy udział w emisji gazów cieplarnianych w Polsce ma kategoria „Energia”. W 1998 r. udział elektrowni i elektrociepłowni zawodowych w całkowitej emisji dwutlenku węgla wyniósł 44% (40,6% z zakładów spalających węgiel brunatny i 59,4% z zakładów spalających węgiel kamienny).

W ostatnich latach emisja gazów cieplarnianych w Polsce nie przekroczyła poziomu określonego zobowiązaniami Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (czyli wielkości emisji w roku bazowym 1988) i jest ona mniejsza niż w 1988 r. W latach 1998 i 1999 nastąpił jej znaczący spadek, do poziomu emisji równej 71% z roku bazowego.

Prognozy dotyczące emisji CO<sub>2</sub> w Polsce są mniej optymistyczne i potwierdzają w najbliższych kilkunastu latach wzrost emisji gazów spalinowych do atmosfery, w tym i dwutlenku węgla. Struktura zużycia kopalnych paliw stałych na potrzeby energetyczne w Polsce jest niekorzystna, a krajowa emisja dwutlenku węgla, przypadająca na jedną tonę spalanej paliwa umownego (ekwiwalentu ropy) należy do najwyższych w Europie (ok. 3,5 tony CO<sub>2</sub> /1 toe) (Marzec & Czajakowska, 1999). Dlatego problem ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> w Polsce będzie coraz bardziej aktualny. Możliwości technologiczne jej zmniejszenia lub/albo radykalnego ograniczenia energochłonności gospodarki polskiej są nieduże. Prognozy Ministerstwa Gospodarki dotyczące bilansu węgla kamiennego, ropy naftowej oraz gazu ziemnego, we wszystkich trzech scenariuszach (**Przetrwania**, **Odniesienia** i **Postępu-Plus**) przewidują do 2020 r. wzrost zapotrzebowania na te paliwa przez elektrownie i elektrociepłownie zawodowe. Dane te wskazują, że należy oczekiwać wzrostu produkcji energii elektrycznej od ok. 41% (scenariusz **Przetrwania**) do ok. 66% (scenariusz **Postępu-Plus**; Kozłowski, 2001; Ney, 2001). Według opracowania Polskiego Komitetu Światowej Rady Energetycznej należy również oczekiwać znacznego wzrostu zapotrzebowania na energię pierwotną do 2020 r. (Nodzyński, 2001).

\*Polska Akademia Nauk, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, ul. Wybickiego 7, 30-950 Kraków 65; \*radek@min-pan.krakow.pl; \*\* umb@min-pan.krakow.pl



**Ryc. 1.** Światowa emisja dwutlenku węgla (dane za: Carbon Dioxide Information Analysis Centre)

**Fig. 1.** Global emissions in the years 1900–1998 (after Carbon Dioxide Information Analysis Centre)

Jednym ze sposobów ograniczenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery jest limitowanie jego emisji. Wymaga to znacznych inwestycji i większego wykorzystania droższych, czystych, odnawialnych energii. Alternatywą limitowania emisji dwutlenku węgla do atmosfery może być jego unieszkodliwienie (sekwestracja) w geosferze. Podziemne magazynowanie stwarza możliwość redukcji emitowanego dwutlenku węgla w oczekiwaniu na rozwój innych źródeł energii.

Tematyka dotycząca podziemnego składowania dwutlenku węgla dotyczy wielu dziedzin nauki i jest w kręgu zainteresowania licznych grup społecznych: polityków ustalających opłaty za emisję i wprowadzających w życie ustalenia międzynarodowe dotyczące wielkości emisji, kompani elektroenergetycznych stojących przed problemem ograniczenia poziomu emisji, potencjalnych inwestorów poszukujących nowych rynków, firmy naftowe wykorzystujące magazynowanie do intensyfikacji wydobycia węglowodorów lub zamierzające udostępnić swoje szczypane złoża do składowania tego gazu, przedstawiciele różnych dziedzin nauki, np. geologów, inżynierów złożowych, górników, chemików i innych.

Celem artykułu jest przedstawienie zarysu problematyki dotyczącej podziemnego magazynowania dwutlenku węgla i zainteresowanie tym zagadnieniem szeroko pojętego środowiska geologicznego w Polsce. Choć tematyka ta w literaturze europejskiej i światowej doczekała się licznych publikacji i opracowań, w Polsce widoczny jest brak szerszego zainteresowania tym problemem. Przy nielicznych, znaczących i oryginalnych opracowaniach w literaturze polskiej, w artykule wykorzystano najnowsze publikacje zagraniczne dotyczące podziemnego magazynowania dwutlenku węgla.

#### Koncepcja podziemnego magazynowania dwutlenku węgla

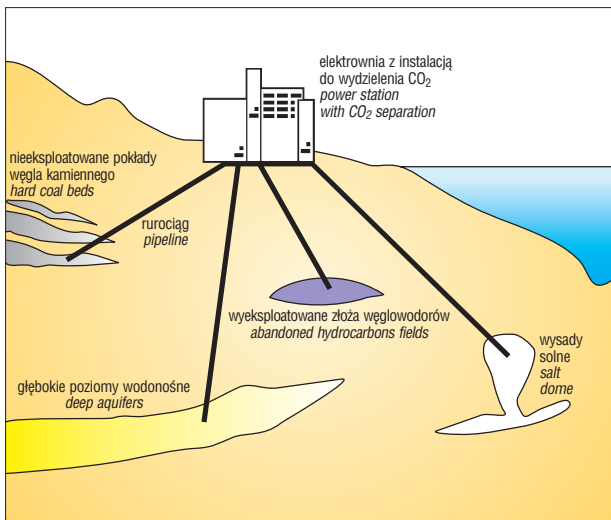
Spośród sposobów redukcji emisji dwutlenku węgla emitowanego do atmosfery, podziemne składowanie

wyduje się bardzo interesujące, nie tylko ze względu na objętość deponowanego gazu ale i okres przechowywania (ryc. 2). Koncepcja podziemnego magazynowania CO<sub>2</sub> została przedstawiona w wielu publikacjach (Herzog, 2000; Herzog i in., 2000; Holloway 1996, 2002; Holloway i Van der Straaten, 1995; Marzec, 2001; May i in., 2002 i inne).

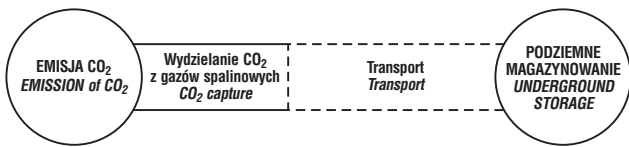
Możliwe jest magazynowanie CO<sub>2</sub> w głęboko zalegających i przepuszczalnych skałach, przykrytych utworami nieprzepuszczalnymi. Rozważa się różne miejsca podziemnego składowania CO<sub>2</sub>: głębokie poziomy wodonosne, wyeksploatowane złoża ropo- i gazonośne, pokłady węgla, wyeksploatowane wysady solne (Herzog i in., 2000; Holloway, 1996, 2002; Holloway i Van der Straaten, 1995; May i in., 2002).

Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla jest procesem złożonym. Obejmuje ono trzy podstawowe etapy: wydzielenie CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych, transport i podziemne zmagazynowanie dwutlenku węgla (ryc. 3). Jednym z założeń tego przedsięwzięcia jest zapewnienie, że dwutlenek węgla będzie przechowywany pod ziemią w sposób bezpieczny i nieinwazyjny dla środowiska (Herzog i in., 2000; Holloway, 2002). Stąd też zasadnicze problemy podnoszone w publikacjach dotyczących podziemnego składowania CO<sub>2</sub> sprowadzają się do odpowiedzi na pytania: gdzie go można magazynować, jakie ilości gazu można deponować, jak można sprawdzić czy składowanie jest bezpieczne.

Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla jest technicznie możliwe. Nie znaczy to, że jest możliwe wszędzie. Uzależnione jest przede wszystkim od warunków geologicznych. Na złożu Sleipner, w norweskiej części Morza Północnego, rocznie jest składowane około 1 Mt dwutlenku węgla. W licznych złożach węglowodorów w USA, dwutlenek węgla zatłacza się pod ziemię w celu intensyfikacji wydobycia tych surowców. Na świecie znane są naturalne złoża CO<sub>2</sub>. Istnieją one od wielu milionów lat i są dowodem, że magazynowanie podziemne może obejmować okres liczony czasem geologicznym.



Ryc. 2. Koncepcja podziemnego składowania dwutlenku węgla  
Fig. 2. Underground storage CO<sub>2</sub> conception



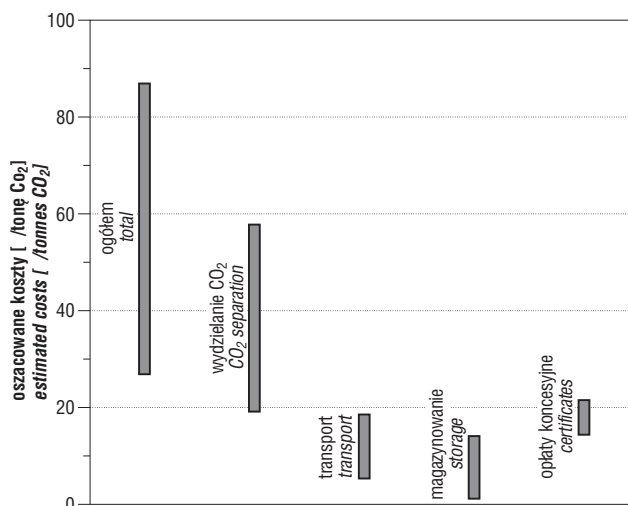
Ryc. 3. Etapy podziemnego unieszkodliwiania dwutlenku węgla  
Fig.3. Stage of underground carbon dioxide sequestration

### Wydzielanie CO<sub>2</sub> i transport

Dwutlenek węgla może być pozyskiwany z trzech podstawowych źródeł (Herzog, 2000). Pierwsze, to procesy przemysłowe, w których jako produkt uboczny wytwarzany jest skoncentrowany strumień tego gazu. Drugie to elektrownie emitujące do atmosfery ponad jedną trzecią światowej emisji CO<sub>2</sub>. Trzecim źródłem tego gazu może być (w przyszłości) produkcja paliw wodorowych.

Najlepszymi miejscami do wydzielenia dwutlenku węgla z gazów spalinowych są duże przemysłowe źródła emisji: elektrownie, elektrociepłownie, cementownie i rafinerie. Elektrownie spalające paliwa kopalne są w większości krajów dominującymi źródłami emisji dwutlenku węgla. Ma to również miejsce w Polsce (Tarkowski & Uliasz-Misiak, 2002). Średnie stężenie dwutlenku węgla w gazach wylotowych, emitowanych przez elektrownie i elektrociepłownie opalane węglem, wynosi ok. 15% objętości, a przez opalane gazem ziemnym od 4–10%.

**Wydzielanie CO<sub>2</sub>.** Wydzielanie dwutlenku węgla na skalę przemysłową jest operacją drogą i skomplikowaną. Szacuje się, że koszty tego procesu stanowią około 3/4 całkowitych kosztów unieszkodliwiania CO<sub>2</sub> (Herzog, 2000; May i in., 2002). Rozważane są następujące możliwości odseparowania dwutlenku węgla od innych gazów (Garrigues, 2001; Farla i in., 1995; Herzog, 2000; Koniecznyński, 1993, Marzec, 2001): absorpcja (chemiczna i fizyczna), adsorpcja (fizyczna i chemiczna), destylacja niskotemperaturowa, membrany separujące gaz, mineralizacja i biomineralizacja. Stosowanie ich



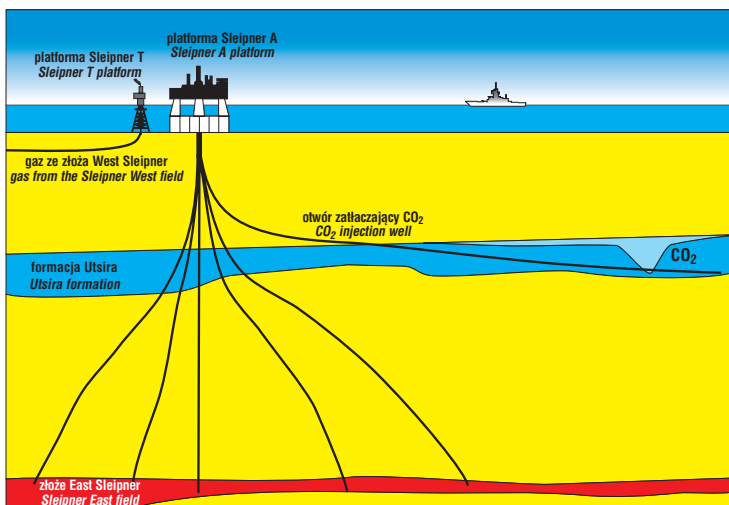
Ryc. 4. Koszty składowania CO<sub>2</sub> (na podstawie złoża Sleipner i IAEA Greenhouse Gas R&D Programme) (za: May i in., 2002)  
Fig. 4. Carbon dioxide storage costs (on the ground of Sleipner fields and IAEA Greenhouse Gas R&D Programme) (after May et al., 2002)

na skalę wielkoprzemysłową jest dzisiaj trudne i energochłonne, a najczęściej stosowana jest chemiczna metoda absorpcji dwutlenku węgla. Metoda ta będzie wykorzystywana przez najbliższe lata, gdyż najlepiej nadaje się do oczyszczania dużych ilości gazów spalinowych.

### Transport

Dwutlenek węgla można transportować w stanie gazowym, płynnym, stałym lub w stanie przejściowym określanym jako gęsta faza gazowa. Transport dużych ilości dwutlenku węgla jest drogi i energochłonny. Dlatego też uwzględnienie już dzisiaj, przy projektowaniu elektrowni i dużych elektrociepłowni, podziemnego składowania dwutlenku węgla, pozwoliłoby w przyszłości uniknąć problemu odległego transportu (*Les Routes...*, 1997).

Do transportu dużych ilości gazu, pomiędzy miejscem jego wychwycenia a miejscem składowania, najlepiej nadają się rurociągi. Transportowany gaz musi być sprężony. Rurociągi transportujące dwutlenek węgla są wykorzystywane w USA, a najdłuższy z nich — rurociąg



Ryc. 5. Załaczanie CO<sub>2</sub> do głębokiego poziomu wodonośnego Utsira w złożu Sleipner (za: Arts i in., 2001)  
Fig. 5. Injection CO<sub>2</sub> into deep aquifer in Sleipner fields (after Arts et al., 2001)

McElmo Dome ma długość 800 km (Holloway, 2002). W przypadku składowania podmorskiego, można wykorzystać statki przystosowane do transportu dwutlenku węgla, podobnie jak metanowce (*Les Routes...*, 1997).

### Koszty wydzielenia, transportu i magazynowania CO<sub>2</sub>

Na koszt podziemnego unieszkodliwiania dwutlenku węgla (ryc. 4) ma wpływ wiele czynników (David & Herzog, 2001; Farla i in. 1995; Hendriks & Blok, 1995; Herzog, 2000; Holloway, 1996, 2002; May i in., 2002): ilość składowanego gazu, odległość źródła emisji od miejsca składowania (pod ziemią lub dnem morza), głębokość otworu, wielkość i chłonność zbiornika, zagospodarowanie terenu, koszty otworów wiertniczych itd. W szczególności obejmują one koszty: schłodzenia spalin, wydzielenia gazu, jego sprężania, transport do miejsca składowania, wtłaczanie pod ziemię lub w głębiny oceanu i inne.

Podawane przez różnych autorów koszty unieszkodliwiania dwutlenku węgla wykazują duże zróżnicowanie. Koszty transportu i podziemnego magazynowania są niewielkie w porównaniu z kosztami wydzielenia gazu. Szacunki kosztów podziemnej sekwestracji CO<sub>2</sub> wykonane przez TotalFina Elf podają wartość 70 USD/t CO<sub>2</sub>, z czego 40 USD przypada na wydzielenia, 10 USD na transport rurociągami (przy długości powyżej 100 km) i 20 USD na zatłaczanie do zbiornika na głębokość 1000–2000 m (Garrigues, 2001). Według danych Departamentu Energii USA, łączne koszty związane z podziemnym magazynowaniem CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych na lądzie lub w oceanie, szacuje się na poziomie 100 do 300 USD/t, w przeliczeniu na C (Holloway, 1996).

Koszty tej operacji są wysokie i jest to dzisiaj główna przeszkoda wprowadzenia na szerszą skalę podziemnego magazynowania dwutlenku węgla, pochodzącego ze spalania paliw konwencjonalnych w elektrowniach. Aby proces wydzielenia i unieszkodliwiania CO<sub>2</sub> mógł być stosowany na skalę przemysłową, koszty muszą ulec znacznej redukcji (Garrigues, 2001). Boddżem może być wprowadzenie wysokich opłat za emisję dwutlenku węgla do atmosfery, tak jak to miało miejsce w Norwegii.

### Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla

**Mechanizm podziemnego magazynowania CO<sub>2</sub> w skałach zbiornikowych.** W długim okresie, składowanie dwutlenku węgla w złożu jest określone przez oddziaływanie czterech podstawowych mechanizmów (Holloway, 2002):

- unieruchomienie w pułapkach złożowych — zastępowanie płynów złożowych przez CO<sub>2</sub>,
- rozpuszczanie w otaczających płynach złożowych,
- geochemiczne reakcje z płynami złożowymi lub minerałami budującymi skały,
- i jeśli uszczelnienie nie jest doskonałe, migracja poza złożo, w którym prowadzi się geologiczne składowanie.

Przed rozpoczęciem zatłaczania CO<sub>2</sub> konieczne jest sporządzenie szczegółowej charakterystyki geologicznej złoża, którego będzie dotyczyć ten proces. W trakcie zatłaczania należy prowadzić monitoring składowania. Wykorzystuje się tu badania sejsmiczne oraz znacznie tańsze badania grawimetryczne o dużej rozdzielczości (Arts & in., 2000; Eiken i in., 2001).

### Potencjał podziemnego magazynowania

Potencjał podziemnego magazynowania zależy od wielu czynników (Arts i in., 2000; Chadwick i in., 2000; Hendriks & Blok, 1995; Herzog i in., 2000; Holloway, 1996, 2002; Holloway & Van der Straaten, 1995; Holt i in., 1995) i w przypadku konkretnego złoża wymaga indywidualnego modelowania (Gupta i in., 2000; Herzog i in., 2000; Holt i in., 1995). Łatwiej jest go określić dla pułapek geologicznych, szczypanych złóż węglowodorów, znacznie trudniej dla horyzontów wodonośnych (Holloway & Van der Straaten, 1995). Szacunki potencjału podziemnego magazynowania, przedstawione w licznych publikacjach, są uzależnione od przyjętych metod i dodatkowych uwarunkowań. Oprócz podstawowych parametrów, takich jak porowatość zbiornika, miąższość i porowatość skał, uwzględnia się: objętość horyzontu wodonośnego odpowiedniego do magazynowania, gęstość CO<sub>2</sub> w warunkach złożowych, możliwość występowania pułapek poza właściwym złożem, potencjał formacji do rozpuszczania i mieszania się dwutlenku węgla z płynami złożowymi, potencjał z jakim skała może zatrzymać CO<sub>2</sub> poprzez wytrącanie węglanów, prędkość przepływu wód podziemnych i inne.

Ilość dwutlenku węgla jaką możemy zdeponować pod ziemią może być rozważana w skali globalnej lub konkretnego złoża. Szacunki globalnej lub regionalnej zdolności podziemnego magazynowania CO<sub>2</sub> (Bergman & Winter, 1995; Chadwick i in., 2000; Holloway, 1996, 2002; Holloway & Van der Straaten, 1995; Hendriks & Blok, 1995) pokazują na szeroką rozpiętość wyników.

Objętość podziemnych struktur geologicznych możliwa do wykorzystania w składowaniu dwutlenku węgla na świecie szacowana jest od 100 do 10 000 Gt CO<sub>2</sub> przez Bergmana i Wintera (1995), od 400 do 10 000 Gt przez Hendriksa i Bloka (1995), przez Van der Meera na 425 Gt, a przez Koide na 320 Gt (za: Holloway, 2002). Pomimo dużych rozpiętości wyników, nawet najmniejsza wartość 320 Gt pozwala na zmagazynowanie 10 Gt CO<sub>2</sub> rocznie przez 32 lata, co mogłoby wywrzeć znaczący wpływ na globalną redukcję emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery. Hendriks i Blok (1995) szacują potencjał złóż gazu ziemnego od 600 do 1500 Gt, złóż ropy naftowej od 200 do 400 Gt, a horyzontów wodonośnych od kilkuset do kilku tysięcy Gt. Światowy potencjał magazynowania dwutlenku węgla w horyzontach wodonośnych jest rozłożony bardziej równomiernie niż w złożach ropy i gazu (Hendriks & Blok, 1995).

**Fizyczne i chemiczne efekty zatłaczania.** Podczas podziemnego zatłaczania dwutlenku węgla dochodzi do fizycznych przemian gazu, zwiększenia jego gęstości (Bachu, 2002; Holloway, 2002; May i in., 2002; Stopa & Blicharski, 2000). Przy głębokościach poniżej 800 m, w normalnych warunkach, tj. gradiencie geotermalnym około 30°C/km i gradiencie ciśnienia około 10,5 MPa/km, gęstość CO<sub>2</sub> waha się między 650 a 680 kg/m<sup>3</sup>. Jedna tona CO<sub>2</sub>, przy gęstości 700 kg/m<sup>3</sup> zajmuje 1,43 m<sup>3</sup> lub mniej niż 6 m<sup>3</sup> skały o porowatości 30%, w której 80% wody z porów zostało zastąpione przez gaz. Przy temperaturze 0°C i ciśnieniu 1 atmosfery, jedna tona CO<sub>2</sub> zajmuje objętość 509 m<sup>3</sup>. Dwutlenek węgla może być magazynowany w stanie zagęszczonym, w porowatych i przepuszczalnych skałach zbiornikowych bez potrzeby tworzenia specjalnych warunków ciśnieniowych (Holloway & Van der Straaten, 1995).

Zatłaczanie CO<sub>2</sub> do zbiorników węglanowych prowadzi do rozpuszczenia minerałów węglanowych, szczególnie w sąsiedztwie otworu zatłaczającego. Przepuszczalność podnosi się znacząco wokół miejsca zatłaczania i może się obniżyć w kierunku granic zbiornika (Holloway, 1996). Zatłaczanie do zbiorników piaskowcowych wywołuje rozpuszczanie się skaleni, a w dalszej kolejności wytrącanie się minerałów ilastych, węglanów i kwarcu. Łupki i anhidryty uszczelniające zbiorniki dwutlenku węgla są mniej podatne na reakcję z tym gazem. Dlatego też oddziaływanie CO<sub>2</sub> — płyny złożowe—skała, powinno być w każdym przypadku szczegółowo analizowane (Holloway, 1996, 2002; Holloway & Van der Straaten, 1995).

**Magazynowanie w poziomach wodonośnych.** Magazynowanie dwutlenku węgla w poziomach wodonośnych zostało omówione w pracach: Holloway (2002), Holloway i Van der Straaten (1995), Holt i in., (1995); Tanaka i in., (1995), Torp i Gale (2002) i innych. Holloway i Van der Straaten (1995) szczegółowo przedstawili możliwości podziemnego składowania dwutlenku węgla w poziomach wodonośnych: płytkich i głębokich, otwartych i zamkniętych, lądowych i podmorskich. Wyróżnili dwie kategorie: poziomy zawierające wody słodkie oraz głębokie poziomy zasolone lub solankowe. Pierwsze, są w większości źródłami wód pitnych i są chronione przez uregulowania prawne. Drugie natomiast nadają się do podziemnego składowania dwutlenku węgla.

W USA rozważano możliwość podziemnego składowania dwutlenku węgla emitowanego przez duże elektrownie, w powiązaniu z głębokimi poziomami wodonośnymi (Bergman i Winter, 1995). Badania wskazują, że ok. 65% gazu emitowanego przez elektrownie mogłoby być zatłaczane bezpośrednio do poziomów wodonośnych, bez konieczności transportu długimi rurociągami. Wysokie koszty wydzielenia gazu, przy małych opłatach za jego emisję do atmosfery powodują, że w chwili obecnej trudno jest przekonać elektrownie w USA do podziemnego magazynowania CO<sub>2</sub>.

**Magazynowanie w złożach ropy naftowej i gazu ziemnego.** Opis możliwości składowania dwutlenku węgla w złożach węglowodorów przedstawili: Holloway (2002); Holloway i Van der Straaten (1995); Holt i in. (1995) i inni. Złoża ropy lub gazu ziemnego, najlepiej wyeksploatowane, są naturalnymi, podziemnymi pułapkami płynów złożowych, w których surowce te znajdowały się kilka lub kilkadziesiąt milionów lat. Złoża eksploatowane lub szczypane są rozpoznane pod względem budowy i wydajności; można wykorzystać istniejącą infrastrukturę do przesyłu i zatłaczania dwutlenku węgla. Odgrywają one dzisiaj istotną rolę w podziemnym unieszkodliwianiu CO<sub>2</sub>. Rozpoczęcie zatłaczania dwutlenku węgla wkrótce po zakończeniu eksploatacji złoża, może umożliwić wypełnienie prawie całej przestrzeni początkowo wypełnionej przez wydobyty gaz (Holloway & Van der Straaten, 1995). Dodatkową korzyścią może być intensyfikacja wydobywania gazu ziemnego lub ropy naftowej pod koniec okresu jego eksploatacji. Umożliwi to dodatkowe pozyskanie węglowodorów przy równoczesnym unieszkodliwieniu pod ziemią dwutlenku węgla (Holt i in., 1995).

**Magazynowanie w pokładach węgla.** Nie eksploatowane ze względów ekonomicznych pokłady węgla stanowią potencjalne miejsce składowania dwutlenku węgla. Gaz ten przechodząc przez pory w węglu, jest na nim absorbowany. Dwutlenek węgla ma większe powinowactwo absorpcji na węglu niż metan. Pompowany do

pokładów węgla będzie nie tylko na nim absorbowany, ale również będzie wypierał metan (Holloway, 2002). Pozyskany w ten sposób metan może stanowić wartość ekonomiczną, a wtłaczanie dwutlenku węgla może dodatkowo zmniejszyć koszty magazynowania.

**Przykłady podziemnego magazynowania.** Na świecie mamy kilka przykładów przemysłowego, podziemnego składowania dwutlenku węgla. W Norwegii, na Morzu Północnym, do złoża gazu ziemnego Sleipner, zatłacza się CO<sub>2</sub> (Arts i in., 2000; Chadwick i in., 2000; Garrigues, 2001, Herzog i in., 2000; Holloway 1996, 2002; Torp i Gale, 2002; Korbul & Kaddour, 1995). Złoże ropy naftowej Weyburn w Kanadzie (Garrigues, 2001) jest kolejnym przykładem pokazującym jak podziemne zatłaczanie CO<sub>2</sub> sprzyja intensyfikacji wydobywania ropy naftowej. Rocznie magazynowane jest w nim ok. 1,8 Mt tego gazu. Podobny zabieg stosowany jest dziś w kilkudziesięciu małych złożach węglowodorów w USA (Holloway, 2002; Herzog i in., 2000). Pozwala to unieszkodliwić dwutlenek węgla i jednocześnie zwiększyć wydobywanie w końcowym etapie eksploatacji złoża. We wszystkich realizowanych obecnie projektach dwutlenek węgla wychwytuje się ze względów komercyjnych, mając również na uwadze ochronę środowiska.

**Złoże Sleipner.** Magazynowanie dwutlenku węgla na skalę przemysłową jest prowadzone w Norwegii na złożu gazu ziemnego Sleipner. Od 1996 roku, Statoil eksploatujący złożo, wydobywa gaz ziemny z równoczesnym zatłaczaniem dwutlenku węgla. Wydobywany gaz zawiera od 4 do 9,5% CO<sub>2</sub>; przeznaczony do sprzedaży nie może mieć go więcej niż 2,5%. Wydzielanie dwutlenku węgla i jego zatłaczanie odbywa się bezpośrednio na morzu.

Gaz ziemny eksploatuje się 18 otworami z jednej platformy (Sleipner B). W celu przetworzenia jest on transportowany na inną platformę (Sleipner T) (ryc. 5). Dwutlenek węgla zatłaczany jest do utworów piaszczystych zawierających solankę (formacja Utsira), o miąższości do 200 m, zalegających na głębokości 1000 m pod dnem morza. Dokonuje się to kierunkowymi otworami iniekcyjnymi, o długości około 4000 m. Podziemny magazyn dwutlenku węgla od góry jest uszczelniony łupkami i mułwcami, które zapobiegają wypływowi CO<sub>2</sub> i wnikaniu gazu do atmosfery. Nie jest on połączony ze złożem węglowodorów, położonym na głębokości 3500 m. W momencie rozpoczęcia opisywanego przedsięwzięcia, w Norwegii obowiązywały wysokie opłaty za emisję CO<sub>2</sub> (35 /t CO<sub>2</sub>). To zachęciło Statoil do jego podziemnego unieszkodliwiania. Inwestycja ta okazała się opłacalna i zwróciła się już po ok. 2 latach. Rocznie około 1 Mt CO<sub>2</sub> (3% produkcji gazu ziemnego w Norwegii) jest separowane z gazu ziemnego i składowane pod dnem morza.

**Intensyfikacja wydobywania węglowodorów.** Zatłaczanie dwutlenku węgla do formacji geologicznych, w celu intensyfikacji wydobywania węglowodorów (Enhanced Oil Recovery) jest obecnie technologią sprawdzoną i stosowaną. Jest ona prowadzona na 74 złożach ropy w USA. Pozwala na podziemne zmagazynowanie 32 Mt CO<sub>2</sub>/rok, pochodzącego ze zbiorników naturalnych oraz antropogenicznych. Z punktu widzenia przemysłowego kontrolowany odzysk ropy przy wtłaczaniu CO<sub>2</sub> jest opłacalny, a dodatkowa produkcja ropy wpływa na obniżenie kosztów podziemnego magazynowania dwutlenku węgla.

W Kanadzie do złoża Weyburn (S część Saskatchewan), którego produkcja spadała po wydobywaniu 55 mln m<sup>3</sup> ropy naftowej, w ramach projektów EOR, dwutlenek

węgla jest zatłaczany w celu intensyfikacji wydobycia ropy naftowej. Wtłaczany gaz jest antropogeniczny i pochodzi z gazowni usytuowanej w północnej części stanu Dakota (USA). Jest on transportowany rurociągami na odległość 330 km do złoża Weyburn. Od 2000 r., 5000 ton gazu jest codziennie wtłaczane do złoża ropy, na głębokość 800 m. W trakcie trwania projektu (20 lat) planuje się zmagazynować 18 Mt CO<sub>2</sub>. PanCanadian Resources eksploatujący złożo ma nadzieję na dodatkowe wydobycie 20 mln m<sup>3</sup> ropy.

Podobne przedsięwzięcie planuje się na złożu gazu ziemnego Natuna, w południowo-wschodniej Azji. Udział dwutlenku węgla w złożu gazu jest tutaj bardzo wysoki; podczas eksploatacji zamierza się go podziemnie magazynować.

**Projekt Snohvit.** W najbliższych latach na morzu Barentsa, w północnej Norwegii, planuje się uruchomienie pierwszej instalacji LNG w Europie. Gaz ziemny ze złoża Snohvit zawiera około 5% CO<sub>2</sub>. Musi on być usunięty w trakcie procesu wytwarzania płynnego gazu. Planuje się zatłaczanie go z powrotem do złoża, w ilości 700 tys. ton CO<sub>2</sub>/rok. Cała instalacja zlokalizowana będzie na dnie morskim na głębokości 250–345 m. Kondensat przesyłany będzie rurociągami na ląd, do zakładu produkującego płynny gaz. Tam też będzie oddzielany dwutlenek węgla, skąd będzie transportowany z powrotem do złoża w celu zatłoczenia. Realizacja projektu, który jest największym przedsięwzięciem przemysłowym na północy Norwegii, rozpoczęła się w 2002 r., a zakończenie przewidziane jest na 2006 r. (Grabarczyk, 2003).

**Zatłaczanie w pokłady węgla.** Eksperymenty mające na celu pozyskiwanie metanu z węgla (ECBM), przy wykorzystaniu zatłaczania dwutlenku węgla i płynnych gazów, prowadzone były w USA na złożu San Juan (Kolorado/Nowy Meksyk), Warrior Basin (Alabama), w Albercie oraz w Australii na złożu Bowen Basin. Po roku 1996, do złoża San Juan zatłoczono ponad 0,1 Mt CO<sub>2</sub>. Rezultaty okazały się zachęcające do prowadzenia dalszych prac. Wyniki badań wskazały, że ze względów ekonomicznych produkcja metanu jest możliwa jedynie z pokładów węgla o dostatecznej przepuszczalności. Pozyskany w ten sposób metan wpływa na zmniejszenie kosztów magazynowania CO<sub>2</sub>.

**Bezpieczeństwo i społeczna akceptacja.** Podziemne składowanie dwutlenku węgla stwarza zagrożenie dla ludzi i środowiska. Może ono wystąpić w czasie transportu gazu rurociągami do miejsc podziemnego magazynowania, jak również w przypadku wydobycia się gazu ze złoża. Dlatego też niezbędne jest przewidywanie możliwych następstw dla środowiska, a wybrana do składowania formacja geologiczna powinna być stabilna w długim okresie czasu (Holloway, 1996, 2002; Herzog i in., 2000; Lenstra i Engelenburg, 2001, May i in., 2002).

Czy możliwe jest zagwarantowanie bezpiecznego i stabilnego magazynowania dwutlenku węgla pod ziemią? Pytanie to jest jednym z istotnych problemów związanych z podziemnym składowaniem tego gazu. Od odpowiedzi będzie zależała publiczna akceptacja podziemnego magazynowania CO<sub>2</sub>. Bezpieczeństwo składowania może być weryfikowane poprzez badanie analogicznych, naturalnych nagromadzeń tego gazu i jego wpływu na środowisko (Holloway, 2002). Od milionów lat gaz ten tworzy naturalne złoża pod ziemią, a zbiornik McElmo Dome (USA, Kolorado) jest tego dobrym przykładem. Dzięki takim

miejscom wiemy, że dwutlenek węgla można unieszkodliwić pod ziemią w sposób bezpieczny (Herzog i in., 2000).

Zagrożenia dla ludzi i środowiska, wynikające z podziemnego magazynowania dwutlenku węgla należy minimalizować przez odpowiednie projektowanie i monitorowanie wszystkich etapów tego przedsięwzięcia. Istotnym jest czas, którego dotyczy podziemne magazynowanie. Wymagany okres składowania jest większy niż czas istnienia danego przedsięwzięcia. Dlatego powstaje szereg problemów: własnościowych, monitoringu i odpowiedzialności za powstałe w przyszłości wycieki gazu (Holloway, 1996) i inne. Istotne są również uwarunkowania polityczne, prawne i socjologiczne inwestycji związanych z podziemnym składowaniem CO<sub>2</sub> (Holloway & Van der Straaten, 1995). Instrumenty polityczne państwa, np. wysokie kary za emisję gazów do atmosfery, mogą w istotny sposób wpłynąć w przyszłości, na zainteresowanie podziemnym magazynowaniem dwutlenku węgla.

### Celowość podjęcia tematyki podziemnego składowania CO<sub>2</sub> w Polsce

Protokół do Konwencji w Rio de Janeiro (*Protokół z Kyoto*, 1997 r.) zobowiązuje Polskę do redukcji emisji gazów cieplarnianych do atmosfery w latach 2008–2012, o 6%, w stosunku do roku odniesienia (dla Polski rok 1988). Obecna emisja CO<sub>2</sub> jest poniżej tego poziomu. Jednakże w kontekście prezentowanych we wstępie scenariuszy, wielkość emisji przeznaczonych do redukcji może być znaczna. Konieczność dostosowania się do umów międzynarodowych oraz: przewidywany w najbliższych latach wzrost emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery, niewielkie możliwości technologiczne zmniejszenia emisji i radykalnego ograniczenia energochłonności przemysłu, uwarunkowania geologiczne umożliwiające podziemne składowanie CO<sub>2</sub>, uzasadniają celowość podjęcia prac dotyczących podziemnego składowania CO<sub>2</sub> w złożach surowców płynnych w Polsce. Istnieją dodatkowe przesłanki takiego przedsięwzięcia:

□ rosnące w ostatnim dziesięcioleciu zainteresowanie sekwestracją i składowaniem CO<sub>2</sub> w geosferze,

□ brak w Polsce opracowań naukowych dotyczących uwarunkowań geologiczno-górnictwowych podziemnego magazynowania CO<sub>2</sub> w głębokich strukturach geologicznych (ropo- i gazonośnych),

□ możliwość włączenia się z prezentowaną problematyką do programów unijnych (R&D badawczo-wdrożeniowych i sieci doskonałości — Network Excellence) intensywnie rozwijanych w ostatnim dziesięcioleciu w krajach wysokorozwiniętych (UE, USA, Kanada),

□ możliwość skorzystania z instrumentów pozwalających na obniżanie emisji CO<sub>2</sub> poza własnym obszarem (ET — Emissions trading i JI—Joint implementation),

□ inwestycje w Polsce obcego kapitału w ochronę środowiska,

□ możliwość intensyfikacji wydobycia węglowodorów.

Autorzy uważają, że w Polsce istnieją warunki do podziemnego magazynowania dwutlenku węgla. W perspektywie kilku lat pojawi się problem wskazania takich miejsc oraz określenia uwarunkowań geologiczno-górnictwowych przedsięwzięcia. Będzie to dotyczyło obszarów wokół dużych punktowych źródeł emisji CO<sub>2</sub> (np. elektrownie i elektrociepłownie zawodowe). Dlatego należy rozpocząć prace badawcze, w celu wytypowania miejsc podziemnego składowania tego gazu. Jako obszary składowania propo-

nuje się wyeksploatowane złoża węglowodorów (ropy naftowej i gazu ziemnego) położone w pobliżu dużych emitentów CO<sub>2</sub> lub głębokie poziomy wodonośne. W Polsce mamy kilkaset złóż gazu ziemnego i ropy naftowej (Gabzdyl, 1999; Karnkowski, 1999). Część z nich jest część wyeksploatowana, eksploatacja niektórych jest na ukończeniu.

Mamy doświadczenie w podziemnym magazynowaniu gazów. W celu pokrywania długo- i krótkoterminowych, zwiększonych zapotrzebowań na gaz ziemny, wykorzystuje się w Polsce podziemne magazyny gazu, usytuowane w wyeksploatowanych złożach gazu ziemnego oraz kavernach solnych. Obecnie działa 6 podziemnych magazynów gazu, o łącznej pojemności 1,2 mld m<sup>3</sup> (Dudek i in., 2002).

Mamy również uregulowania prawne emisji i składowania dwutlenku węgla. Przepisy regulujące zagadnienia emisji CO<sub>2</sub> i jego składowania ujęte są w dwóch ustawach: Ustawa — *Prawo ochrony środowiska* (POS, 2001) i Ustawa — *Prawo geologiczne i górnicze* (PGG, 1994). Prawo ochrony środowiska reguluje warunki wprowadzania substancji i koszty korzystania ze środowiska. Podziemne składowanie CO<sub>2</sub> regulują przepisy Ustawa — *Prawo geologiczne i górnicze* (PGG, 1994). Przepisy tej ustawy mają zastosowanie do prowadzenia działalności gospodarczej w zakresie bezzbiornikowego magazynowania substancji (dotyczy to podziemnego składowania CO<sub>2</sub>) oraz składowania odpadów w górotworze.

W celu wyboru lokalizacji miejsc podziemnego składowania CO<sub>2</sub> autorzy proponują przeprowadzenie geologicznych badań warunków złożowych w powiązaniu z analizą dużych emitentów CO<sub>2</sub> (Tarkowski & Uliasz-Misiak, 2002). Dotyczą one zebrania i opracowania danych geologicznych, górniczych, złożowych, prawnych i innych. Umożliwią one przygotowanie założeń pod lokalizację doświadczalnej lub przemysłowej instalacji podziemnego składowania CO<sub>2</sub> w Polsce.

### Podsumowanie

Podziemne magazynowanie przemysłowych ilości dwutlenku węgla jest dzisiaj technicznie możliwe. Chociaż prowadzone jest jeszcze na etapie doświadczalnym, pokazuje że w przyszłości może mieć znaczący wpływ na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. Nie jest ono możliwe wszędzie, jest bowiem uzależnione od budowy geologicznej. Zagadnienie bezpieczeństwa składowania będzie tutaj istotnym czynnikiem w przypadku rozważań miejsc składowania.

Stopień zaawansowania prac dotyczących unieszkodliwiania dwutlenku węgla, w krajach UE oraz w USA, wskazuje na wagę jaką te kraje przywiązują do prezentowanej problematyki. Dwutlenek węgla znajduje się w grupie priorytetowych tematów badawczo-wdrożeniowych 6 Programu Ramowego UE. Kilkunastoletnie opóźnienie Polski, jest według autorów, możliwe do częściowego nadrobienia w ramach współdziałania jako partner w którymś z programów UE.

Polska należy do dużych emitentów CO<sub>2</sub>, a prognozy dotyczące emisji wskazują na jej znaczący wzrost w okresie następnych 20 lat. Możliwości technologiczne zmniejszenia emisji lub/albo znacznego ograniczenia energochłonności gospodarki polskiej są nieduże. Zobowiązania Polski dotyczące ograniczenia emisji gazów cieplarnianych wynikające z porozumień międzynarodowych wskazują, że problematyka unieszkodliwiania dwutlenku

węgla, w tym podziemne magazynowanie, będzie w obszarze coraz większych zainteresowań władz odpowiedzialnych za politykę dotyczącą ochrony środowiska.

W sektorze energetyki zawodowej, działa w Polsce kilkudziesięciu dużych emitentów odpowiedzialnych za 44% emisji CO<sub>2</sub>. Istnieją warunki geologiczne do podziemnego magazynowania dwutlenku węgla. Rozpoznano kilkaset złóż gazu ziemnego i ropy naftowej. Część z nich jest już wyeksploatowana lub w końcowej fazie eksploatacji, a niektóre są dzisiaj miejscem magazynowania gazu ziemnego. Posiadamy uregulowania prawne w zakresie emisji gazów do atmosfery oraz podziemnego ich składowania.

Autorzy proponują w pierwszej kolejności, wykorzystanie wyeksploatowanych złóż węglowodorów do podziemnego magazynowania dwutlenku węgla. Wymaga to przeprowadzenia geologicznych badań warunków złożowych w powiązaniu z lokalizacją dużych emitentów CO<sub>2</sub>. Umożliwi to zebranie i opracowanie danych do zaprojektowania pierwszej, doświadczalnej lub przemysłowej instalacji podziemnego składowania CO<sub>2</sub> w Polsce. W dalszej kolejności należy ocenić możliwość magazynowania tego gazu w głębokich poziomach wodonośnych.

Artykuł przygotowano w ramach projektu badawczego KBN nr 5T12B 041 24.

### Literatura

- ARTS R., BREVIK I., EIKEN O., SOLLIE R., CAUSSE E. & VAN DER MEER B. 2000 — Geophysical methods for monitoring marine aquifer CO<sub>2</sub> storage — Sleipner experiences. [In:] Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, ed. Williams D, Durie B., McMullan P., Paulson C. & Smith A., Collingwood, Australia, CSIRO.
- BACHU S. 2002 — Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to change climate: road map of site selection using the transform of geological space into the CO<sub>2</sub> phase space. *Energy Conversion and Management*, 43: 87–102.
- BERGMAN P. D. & WINTER E. 1995 — Disposal of carbon dioxide in aquifers in the U.S. *Energy Conversion and Management*, 36: 523–526.
- Carbon Dioxide Information Analysis Centre.** U.S. Department of Energy. <http://cdiac.esd.ornl.gov>
- CHADWICK R.A., HOLLOWAY S., KIRBY G.A., GREGERSEN U. & JOHANNESSEN P.N. 2000 — The Utsira Sand, Central North Sea — An assessment of its potential for regional CO<sub>2</sub> disposal. [In:] Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, ed. Williams D, Durie B., McMullan P., Paulson C. & Smith A., Collingwood, Australia, CSIRO.
- DAVID J. & HERZOG H. J. 2001 — The cost of carbon capture. [In:] Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, ed. Williams D, Durie B., McMullan P., Paulson C. & Smith A., Collingwood, Australia, CSIRO.
- DUDEK J., FILAR B., DUSZA R. & MIZIOŁEK M. 2002 — Naturalne przechowania. *Nafta & Gaz Biznes*, 10: 8–11.
- EIKEN O., BREVIK I., ARTS R., LINDEBERG E. & FAGERVIK K. 2001 — Seismic Monitoring of CO<sub>2</sub> Injected into a Marine Aquifer. *AAPG Bull.*, 85, 13. (Supplement). *AAPG Ann. Meet.* Denver, Colorado June 3–6, 2001.
- EMITOR 2000. Emisja zanieczyszczeń środowiska w elektrowniach i elektrociepłowniach zawodowych. Agencja Rynku Energii S.A. Warszawa 2001.
- FARLA J.C.M., HENDRIKS C.A. & BLOK K. 1995 — Carbon dioxide recovery from industrial processes. *Energy Conversion and Management*, 36: 827–30.
- GABZDYL W. 1999 — Geologia złóż. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice: 1–356.
- GARRIGUES B. 2001 — CO<sub>2</sub>: l'option du stockage géologique. *Systèmes Solaires*, 146: 58–64.
- GRABARCZYK E. 2003 — Pierwszy w Europie projekt LNG. *Nafta, Gaz & Biznes*, styczeń–luty: 60–62.
- GUPTA N., SASS B. & OCKES J. 2000 — Experimental Evaluation of Chemical Sequestration of Carbon Dioxide in Deep Aquifer Media —

- Phase II — Report: November 2000. Fossil Energy Technical Publications. US Department of Energy.
- HENDRIKS C.H.A. & BLOK K. 1995 — Underground storage of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 36: 539–542.
- HERZOG H. 2000 — The Economics of CO<sub>2</sub> Separation and Capture. *Technology*, 7: 13–23.
- HERZOG H., ELIASSON B. & KAARSTAD O. 2000 — Wylapywanie gazów cieplarnianych. *Świat Nauki*, Maj 2000: 58–65.
- HOLLOWAY S. 1996 — An overview of the Joule II project „The underground disposal of carbon dioxide”. *Energy Conversion and Management*, 37: 1149–1154.
- HOLLOWAY S. 2002 — Underground sequestration of carbon dioxide — a viable greenhouse gas migration option. [In:] *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Int. Symp. On CO<sub>2</sub> Fixation and the Efficient Utilization of Energy (C & E 2002)*. March 4–6, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan: 373–380.
- HOLLOWAY S. & VAN DER STRAATEN R. 1995 — The Joule II project the underground disposal of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 36: 519–522.
- HOLT J., JENSEN J. -T. & LINDEBERG E. 1995 — Underground storage of CO<sub>2</sub> in aquifers and oil reservoirs. *Energy Conversion and Management*, 36: 535–538.
- KARNKOWSKI P. 1999 — Oil and Gas deposits in Poland. *Geosynoptics Society „GEOS”*, Cracow: 1–380.
- KORBUL R. & KADDOUR A. 1995 — Sleipner Vest CO<sub>2</sub> disposal — injection of removed CO<sub>2</sub> into the Utsira Formation. *Energy Conversion and Management*, 36, 6–9: 509–512.
- KOZŁOWSKI Z. 2001 — Krajowe paliwa stałe uzasadnioną alternatywą pokrycia potrzeb wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną w Polsce. *Mat. Konf. „Paliwa i energia dziś i jutro — 2001”* Kraków 12–13 czerwca 2001. Wyd. IGSMiE Kraków: 77–82.
- KONIECZYŃSKI J. 1993 — Oczyszczanie gazów odlotowych. *Wyd. Politechniki Śląskiej*. Gliwice.
- LENSTRA W. J. & VAN ENGELENBURG B.C.W. 2001 — Climate Policy, CO<sub>2</sub> Storage and Public Perception. [In:] *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, ed. Williams D, Durie B., McMullan P., Paulson C. & Smith A., Collingwood, Australia, CSIRO.
- Les Routes Du Gaz Carbonique** 1997 — *Systemes Solaires*, 121: 17–21.
- MARZEC A. 2001 — Nadmierna emisja dwutlenku węgla — inne oblicze globalizacji. *Nafta–Gaz*, 5: 253–260.
- MARZEC A. & CZAJAKOWSKA S. 1999 — Prognozy światowego i krajowego zapotrzebowania na energię i surowce energetyczne oraz ich ekologiczne konsekwencje. *Karbo*, 11: 368–370.
- MAY F., GERLING J.P. & KRULL P. 2002 — Underground storage of CO<sub>2</sub>. *VGB.Powertech*, 8: 1–9.
- NEY R. 2001 — Dylematy polskiej polityki energetycznej na początku XXI wieku. *Mat. Konf. „Paliwa i energia dziś i jutro — 2001”* Kraków 12–13 czerwca 2001 — *Wyd. IGSMiE Kraków*: 59–77.
- NODZYŃSKI R. 2001 — Kierunki i problemy polityki energetycznej Polski w pierwszej połowie XXI wieku. *Mat. XV Konf. z cyklu: Zagadnienia Surowców energetycznych w gospodarce krajowej pt. Stan obecny kompleksu paliwowo-energetycznego Polski i pożądane kierunki jego rozwoju w latach 2002–2030*. Zakopane 14–17 października 2001r. *Wyd. IGSMiE Kraków*: 61–110.
- PGG 1994 — Prawo geologiczne i wiertnicze. *Dz.U.Nr 27*, poz. 96 ze zm. z dnia 4 lutego 1994 r.
- POS 2001** — Prawo ochrony środowiska. *Dz.U.Nr 62* poz. 627 z dnia 27 kwietnia 2001 r.
- STOPA J. & Blicharski J. 2000 — Zjawiska fizyczne zachodzące podczas zatłaczania gazów kwaśnych do horyzontów złożowych. *XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Nowe metody i technologie w geologii naftowej, wiertnictwie i eksploatacji otworowej i gazownictwie*. Kraków 2000, t. II: 141–151.
- TANAKA S., KOIDE H. & SASAGAWA A. 1995 — Possibility of underground CO<sub>2</sub> sequestration in Japan. *Energy Conversion and Management*, 36: 527–530.
- TARKOWSKI R. & ULIASZ-MISIAK B. 2002 — Możliwości podziemnego składowania CO<sub>2</sub> w Polsce w głębokich strukturach geologicznych (ropo-, gazo- i wodonośnych). *Prz. Gór.*, 12: 25–29.
- TORP T. A. & GALE J. 2002 — Demonstrating storage of CO<sub>2</sub> in geological reservoirs: the Sleipner and SACS Projects. [In:] *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Control Technologies*. Kyoto International Conference Hall, Japan, October 1<sup>st</sup> (Tue) — 4<sup>th</sup> (Fri), 2002.